

BEST AVAILABLE COPY

10/501679

DT04 Rec CT/PTO 16 JUL 2004

134.1029

IN THE UNITED STATES PATENT & TRADEMARK OFFICE

Re: Application of: **Michael BERGT, et al.**
Serial No.: To Be Assigned
Filed: Herewith as national phase of International Application
No. PCT/EP03/00446, filed January 17, 2003
For: **FEMTOSECOND LASER SYSTEM FOR THE
EXACT MANIPULATION OF MATERIAL AND
TISSUES**

LETTER RE: PRIORITY

Mail Stop PCT
Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

July 16, 2004

Sir:

Applicant hereby claims priority of German Patent Applications No. 102 02 036.1, filed January 18, 2002 through International Patent Application Serial No. No. PCT/EP03/00446, filed January 17, 2003. Enclosed herewith is a certified copy of the German priority document.

Respectfully submitted,

DAVIDSON, DAVIDSON & KAPPEL, LLC

By



William C. Gehris
Reg. No. 38,156

Davidson, Davidson & Kappel, LLC
485 Seventh Avenue, 14th Floor
New York, New York 10018
(212) 736-1940

**PRIORITY
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)



REC'D 10 MAR 2003
WIPO PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen:

102 02 036.1

Anmeldetag:

18. Januar 2002

Anmelder/Inhaber:

Carl Zeiss Meditec AG, Jena/DE

(vormals: Asclepion-Meditec AG)

Bezeichnung:

Femtosekunden-Lasersystem zur präzisen Bearbei-
tung von Material und Gewebe

IPC:

B 23 K, A 61 F

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 18. Februar 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

CERTIFIED COPY OF
PRIORITY DOCUMENT

10/501679
DT04 Rec'd PCT/PTO 16 JUL 2004

Femtosekunden-Lasersystem zur präzisen Bearbeitung von Material und Gewebe

Die Erfindung betrifft ein Femtosekunden-Lasersystem zur präzisen Bearbeitung von Material und Gewebe, insbesondere ein Lasergerät zur präzisen, mikrometer genauen Bearbeitung von organischem Material, bevorzugt einem Auge.

In einem wertvollen Beitrag zum Stand der Technik wird in der Patentschrift DE¹ 197 46 483 der Anmelderin beschrieben, wie mit Mikrometerpräzision bei der großflächigen Bearbeitung von Materialien mit Lasern mit großem Spotdurchmesser (mm - cm) makroskopische Materialmengen ablatiert, verdampft oder geschmolzen werden (CO₂-Laser, Nd:YAG, Excimer ...).

In einem weiteren wertvollen Beitrag zum Stand der Technik wird in der Patentschrift DE 197 27 573 der Anmelderin ein Algorithmus beschrieben, wie ein Laserstrahl abgelenkt werden kann, um eine bestmögliche und präzise Bearbeitung von Material zu gewährleisten.

In der US 5, 656, 186 wird ein Verfahren zum Bearbeiten vom Material bei gleichzeitiger Vermeidung oder Minimierung von schädigenden Nebenwirkungen (Schmelzränder, thermische Schädigung, akustische Schockwellen, Rissbildung) durch Wahl einer speziellen Pulsdauer in Abhängigkeit vom Material beschrieben.

Die materialbearbeitende Wirkung des Lasers ist dabei auf den kleinen Raumbereich des Laserfokus (typischerweise einige μm^3) beschränkt, in dem die Lichtintensität hoch genug ist, um die Schwelle des optischen Durchbruchs zu überschreiten. Lokalisiert auf dieses Fokusbereich wird der Zusammenhalt des Material zerstört und es entsteht eine Kavitationsblase. Wird der Laserfokus für jeden Laserpuls an eine neue Position gelenkt, können lineare, flächige oder dreidimensionale Schnittmuster generiert werden. Der Abstand benachbarter Kavitationsblasen muss am Ende der Bearbeitung etwa dem Fokusbereich entsprechen, damit das Material entlang der Schnitte leicht mechanisch ablösbar ist.

Die bestehenden Lasergeräte für die Materialbearbeitung mit Femtosekunden-Laserpulsen verwenden regenerative Verstärker, mit denen einzelne Pulse eines Femtosekundenoszillators verstärkt werden. Während der Oszillator selbst nur Pulsenergien im Nanojoule Bereich bereitstellt, können die Pulse mit einem regenerativen

Verstärker bis zu einigen Millijoule Pulsenergie verstärkt werden. Repetitionsraten sind durch die Verwendung von Pockelszellen zur Ein- und Auskopplung in den Verstärker auf einige 10 kHz beschränkt. Während diese Laserquellen für Anwendungen mit hohen Abtragsraten pro Laserpuls geeignet sind, sind sie nicht optimal für die oben beschriebene Anwendung für Präzisionsschnitte.

In K. König et al., *Optics Letters* Vol. 26, No. 11 (2001) wurde beschrieben, wie auch mit Nanojoule-Pulsen aus einem Femtosekunden-Oszillator Schnitte in Gewebe ausgeführt werden können. Da dabei aber ein einzelner Laserpuls nicht zur Ausbildung einer Kavitationsblase führt, sondern mehrere, an die gleiche Stelle platzierte Pulse nötig sind, um eine Schnittwirkung zu erzielen, eignet sich dieses Verfahren nur für sehr feine Schnittfiguren im Mikrometermaßstab. Für den industriellen bzw. medizinischen Einsatz ist diese Laserquelle nicht geeignet.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, eine Vorrichtung zur präzisen Bearbeitung von Material bereitzustellen, mit der diese Nachteile des Standes der Technik überwunden werden.

Diese Aufgabe wird durch das Verfahren und die Vorrichtung nach den unabhängigen Ansprüchen gelöst. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Insbesondere wird die Aufgabe gelöst durch eine Vorrichtung zur präzisen Bearbeitung von Material, insbesondere organischem Material, umfassend ein gepulstes Lasersystem mit einer Strahlquelle, wobei ein cavity-dumped fs-Oszillator als Strahlquelle vorgesehen ist.

Eine ideale Quelle stellen direkt diodengepumpte Femtosekundenoszillatoren (evtl. mit SESAM (semiconductor saturable absorber mirror) zum Start und Stabilisieren des Modelocking und dispersiven Spiegeln (chirped mirrors) zur Dispersionskompensation im Resonator) dar. Durch "cavity dumping" können statt der normalerweise mit mehreren 10 MHz emittierten Nanojoule-Pulse dann Mikrojoule Pulsenergien bei verringerter Repetitionsrate erzeugt werden. Dabei wird, anstatt bei jedem Umlauf eines Laserpulses im Resonator einen geringen Teil der intracavity-Pulsenergie (typisch ca. ein Prozent) passiv auszukoppeln, der Laserpuls für mehrere Umläufe vollständig im Resonator belassen und dann einmalig ein größerer Anteil der Laserleistung aktiv aus dem Resonator ausgekoppelt. Die verbleibende Laserpulsenergie wird dann in mehreren Umläufen im Resonator wieder auf einen Sättigungswert verstärkt bis ein weiterer Puls

ausgekoppelt wird. Bei einer mittleren Laserleistung von einigen mW werden so Laserpulse bis hin zum Mikrojoulebereich bei Repetitionsraten von 0 - einigen MHz erzeugt. Zur aktiven Auskopplung der Laserpulse können elektrooptische oder akustooptische Deflektoren mit schnellen Schaltzeiten verwendet werden. Besonders bevorzugt werden Pulsdauern von unter 10ps, bevorzugt deutlich kürzer als 1ps bevorzugt 100-200 fs erzeugt.

Das bevorzugt mit Mikrometergenauigkeit zu bearbeitende Material kann Material mit Strukturen im Mikrometerbereich, Gitter, Kontaktlinsen, Kunststoffe, Intraokkularlinsen (IOL), Halbleiterwafer, mikrooptische Elemente etc. umfassen. Besonders bevorzugt ist organisches Material, wie beispielsweise Gewebe, besonders bevorzugt das menschliche Auge.

Das gepulste Lasersystem ist eine Anordnung einer Laserstrahlquelle zur Erzeugung von fs-Pulsen und entsprechenden optischen Vorrichtungen, insbesondere Spiegel, Linsen, etc.

Durch diese Laservorrichtung wird ein System bereitgestellt, dessen Pulsenergien bei gleichzeitig hoher Repetitionsrate mikroskopische und makroskopische Schnittfiguren bevorzugt mit Mikrometergenauigkeit ermöglichen. Werden - wie im Stand der Technik - Oszillatoren in regenerativen Verstärker nachverstärkt um Mikrojoule-Pulsenergien zu erzeugen, begrenzen die zur Ein- und Auskopplung in den Verstärker verwendeten Pockelszellen die Repetitionsrate des Laserverstärkersystems. Diese Nachteile existieren bei dem erfindungsgemäßen Laser nicht. Die erfindungsgemäße Vorrichtung ist in der Lage, Mikrojoule-Pulsenergien bei einstellbaren Repetitionsraten von Null bis hin zu einigen MHz zu generieren. Besonders bevorzugt werden Pulsenergien von wenigen Mikrojoule und Repetitionsraten von einigen 100 kHz verwendet. Die Oszillatoren arbeiten dann mit mittleren Leistungen von einigen 100 mW. Besonders bevorzugt wird als Strahlquelle ein direkt diodengepumpter Oszillator verwendet. Dieser ist besonders einfach und zuverlässig.

Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung sind weiterhin Strahleinrichtungen zur Strahlformung und/oder Strahlführung und/oder Strahlablenkung und/oder Strahlfokussierung vorgesehen. Durch diese Strahleinrichtungen kann der Strahl genau so auf das zu bearbeitende Material gelenkt und geleitet werden, wie es die geplante Anwendung erfordert. Die hier auf einen Fokusbereich in der Größenordnung von 1 µm fokussierten ultrakurzen Laserpulse können in einem kleinen, präzise definierten Fokusbereich den Materialzusammenhalt lösen oder strukturelle

Veränderungen im Material hervorrufen ohne benachbarte Gebiete im Material thermisch, akustisch oder mechanisch zu belasten. Für makroskopische Schnitte und Strukturen im Zentimetermaßstab wird der Laserfokus dreidimensional durch das zu bearbeitende Material gescannt. Der Anwendungsfall bestimmt, wie Strahlquelle, Strahlführung und -formung, Scanner, Scanalgorithmus und Fokussieroptik aufeinander abgestimmt werden, um eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig hoher Präzision zu erreichen.

Die Strahlformung geschieht dabei bevorzugt mittels eines Teleskops (bevorzugt Galilei-Teleskop mit Sammel- und Streulinse), das den Strahldurchmesser so aufweitet, dass der Laser auf einen entsprechend kleinen Fokus fokussiert werden kann. Bevorzugt wird ein Linsensystem verwendet, das die Abbildungsfehler des Teleskops weitgehend minimiert.

Die Strahlführung erfolgt bevorzugt durch Spiegel oder Spiegelpaare, mit denen der Strahl in die einzelnen Subkomponenten justiert werden kann.

Die Strahlablenkung können konventionelle Scanner bzw. mechanische Laserstrahl-Ablensysteme wie Galvanometerspiegel im Close-Loop-Betrieb, etc. sein. Bevorzugt jedoch sind mechanische Scanner, die vorgegebene Bahnen (z.B. Kreisbahnen) abfahren und durch Triggerung der Strahlquelle an den vorgesehenen Positionen dadurch Laserpulse ausgelöst werden. So kann auf einem großen Bereich der Schnittfläche mit voller Repetitionsrate bei relativ langsamen Scannerbewegungen gearbeitet werden. Soll in noch kleineren Bereichen der Schnittfläche gearbeitet werden (z.B. wenn der Kreisbahnradius zu klein wird) kann bevorzugt zusätzlich die Repetitionsrate des Lasers reduziert werden. In einem kleinen Bereich der Schnittfläche (wenn z.B. der Kreisbahnradius sehr klein wird), wird dann die Repetitionsrate bevorzugt an die dann kleiner werdende maximale Bahngeschwindigkeit, die durch die begrenzte Winkelgeschwindigkeit des Ablenkmechanismus bedingt ist, angepasst und verringert. Bei einer Ablenkeinheit, die auf der Rotation eines optischen Ablenkelements beruht, kann es technologisch einfacher sein, mit konstanter Drehzahl und somit konstanter Winkelgeschwindigkeit der Bahnbewegung des Laserfokus zu arbeiten. Dann kann die Repetitionsrate des Lasers bei jeder kleiner oder größer werdenden Kreisbahn an die neue Bahngeschwindigkeit, die sich aufgrund des veränderten Bahnradius ergibt, angepasst werden. Dabei ergibt sich für die Bearbeitung einer Kreisfläche eine um nur den Faktor 2 erhöhte Bearbeitungsdauer, als wenn alle Spots mit maximaler Repetitionsrate gesetzt würden. Durch Anpassung der Drehzahl der Ablenkeinheit in wenigen Stufen während der Bearbeitung, kann die Bearbeitungsdauer noch weiter verringert werden.

Die Strahlfokussierung in Richtung dient dazu, im Fokus des Strahls auf oder innerhalb des Materials den Zusammenhalt des Materials aufzuheben (Photodisruption). Im Allgemeinen geht das mit einer lokalen Verdampfung des Materials einher. Bevorzugt wird der Laser hierfür auf einen Durchmesser im Mikrometerbereich fokussiert. Dies liegt nahe am Beugungslimit von Licht im sichtbaren bzw. nahen Infrarotbereich. Die Fokussieroptik weist daher bevorzugt eine hohe numerische Appertur und damit eine kurze Brennweite und eine große optische Öffnung (aufgeweiteter Laserstrahl Durchmesser) aus. Bevorzugt wird der von der Laserquelle ausgehende Strahl vor der Fokussierung auf das Material bzw. Gewebe im Durchmesser aufgeweitet. Die Systeme zur Strahlführung, -ablenkung und -fokussierung sind daher bevorzugt für einen großen Stahldurchmesser ausgelegt.

Laserquelle, Stahlablenkung (Scanner) und Fokussieroptik sind so aufeinander abgestimmt, dass präzise und schnelle Schnittführung im Wege der Fotodisruption ermöglicht wird. Dabei werden Laserspots mit einem Fokusedurchmesser von einigen 100 nm bis einigen μm mit einem Spotabstand in der Größenordnung des Spotdurchmessers im Material platziert.

In einer besonders bevorzugten Ausführungsform sind die Strahleinrichtungen, insbesondere die Ablenkeinrichtungen, programmierbar. Durch die Abstimmbarkeit der einzelnen Strahleinrichtungen aufeinander und die Steuerung durch entsprechende Programme kann das System der Strahleinrichtungen zusammen mit dem gepulsten Lasersystem genau auf das Material und die Schnittanforderung eingestellt werden, für die es eingesetzt werden soll. So kann in Abhängigkeit der Transparenz und Brechkraft des zu bearbeitenden Materials sowie der Anforderung an Schnittgeometrie und Operationsdauer das Set an Parametern durch das Programm vorgewählt und abgestimmt werden.

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sind weiterhin Haltevorrichtungen zur Positionierung und/oder Fixierung des zu bearbeitenden Materials vorgesehen. Durch diese Haltevorrichtungen wird sichergestellt, dass die mikrometergenauen Strukturen, die durch den erfindungsgemäßen Laser hergestellt werden können, nicht durch unkontrollierbare Bewegungen des zu bearbeitenden Materials, insbesondere Auges, beeinträchtigt werden.

Eine solche Fixier- und Positioniervorrichtung kann eine einfache Klemmvorrichtung für ein Werkstück sein, das bevorzugt mit Mehrachsen-Justagemöglichkeiten zur Bewegung und Verkipfung des Werkstücks zur optimalen Justage ausgestattet ist.

Fixiereinrichtungen für medizinische Anwendungen an Organen, die zum Beispiel dem Auge müssen außerdem den jeweiligen biologischen Gegebenheiten angepasst sein. Die Fixierung des menschlichen Auges kann zum Beispiel mit Hilfe eines Kontaktglases und eines Vakuum-Saugringes erfolgen.

Eine Positionierungsvorrichtung kann bevorzugt ein Kontaktglas sein. Dieses Kontaktglas kann entweder eben sein, oder bevorzugt der Krümmung des zu bearbeitenden Materials, insbesondere der Hornhaut, im Wesentlichen angepaßt sein.

Als Fixiervorrichtung wird bevorzugt ein Saugring verwendet. Der Saugring ist bevorzugt fest mit dem Austrittsfenster des Lasergeräts verbunden, was zu einer definierten Lage der Hornhaut relativ zum Laserfokus führt.

Bei einer weiteren Vorrichtung der vorliegenden Erfindung werden durch den cavity-dumped fs-Oszillator Laserpulse von 100 nJ bis 100 μ J, bevorzugt 1 μ J Pulsenergie bereitgestellt. Mit dieser Pulsenergie kann eine Photodisruption in dem angesteuerten Bereich des Materials im Mikrometerbereich ausgelöst und eine Kavitationsblase erzeugt werden, insbesondere wenn die Pulsdauer unter 300 fs liegt. Ein daneben gesetzter Schuß wird benachbart zu dieser Kavitationsblase eine weitere Kavitationsblase erzeugen. Durch diese Blasen wird dann das Materialgefüge dauerhaft oder für einen bis mindestens zum Ende der Bearbeitung dauernden Zeitraum aufgehoben.

Besonders bevorzugt werden durch den cavity-dumped fs-Oszillator Laserpulse mit Repetitionsraten von 10 kHz bis 10 MHz bereitgestellt. Die Repetitionsrate wird bevorzugt auf die Geschwindigkeit eines Ablensystems (z.B. maximale Drehzahl der Ablenkoptik) abgestellt. Für die Anwendung am Auge wird bevorzugt eine 300 kHz Repetitionsrate bei ca. 50Hz Drehzahl verwendet, was eine Bearbeitungszeit von unter einer Minute ergibt.

Mit diesen Repetitionsraten kann in Abstimmung mit der vorgegebenen Pulsenergie und der Ablenkeinrichtungen die Laserwirkung für die Photodisruption präzise lokalisiert werden. Hierdurch wird in einem scharf begrenzten Fokusbereich das Materialgefüge zerstört, in dicht benachbarten Bereichen (von weniger als ein Mikrometer entfernt) findet im Allgemeinen keine Veränderung des Materials statt. Daraus ergibt sich eine hohe Bearbeitungspräzision (Mikrometergenauigkeit) bei Schonung benachbarter Materialregionen. Thermische und mechanische Beanspruchung der nicht bearbeiteten Regionen sind deutlich geringer als bei anderen Bearbeitungsmethoden.

Bei einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist durch die Strahleneinrichtung, insbesondere die Ablenkeinrichtung, ein Arbeitsstrahl der Strahlquelle in geometrisch vorbestimmbarer Form in zeitlich vorbestimmbarem Verlauf auf das Material applizierbar. Durch das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten ist so möglich, Schnitte und Strukturierungen zu erzeugen. Zur Erzeugung eines Spots, in dem das Materialgefüge aufgelöst wurde, genügt im Allgemeinen ein Laserpuls mit definierten Pulsparametern (Pulsenergie, Pulsdauer, Fokus). Für Schnitte und Strukturierung ist eine Vielzahl solcher Spots dicht nebeneinander zu platzieren. Der Abstand benachbarter Spots sollte am Ende der Prozedur in der Größenordnung des Spotdurchmessers liegen. Dafür kann der Laserfokus scannend über bzw. durch das Material bewegt werden. Der Laserfokus folgt in idealer Weise 3-dimensional mit Mikrometergenauigkeit einer vorgegebenen geometrischen Bahn. So ist es beispielsweise möglich, einen Schnitt in dem zu bearbeitenden Material dadurch zu erzeugen, dass eine beliebige Fläche, zum Beispiel eine Rechteckfläche benachbarter Mikrometerspots in dem Gewebe nacheinander scannend angesteuert wird. Dadurch wird genau in dieser Ebene der Materialzusammenhalt aufgelöst und dadurch ein "Schnitt" im Gewebe erzeugt. Genauso ist es möglich, den Laserfokus durch Kreisbewegungen des Scanners in einer Kreisbahn auf das zu bearbeitende Material zu applizieren. Durch eine sich anschließende helixförmige Führung des Bearbeitungsstrahls kann so beispielsweise eine Zylinderfläche aus dem Material herausgeschnitten werden. Da die Photodisruption bevorzugt in einem sehr engen Bereich stattfindet, kann der Laserstrahl auch im Gewebe wirken, ohne dass das vom Laserstrahl außerhalb des Fokus durchdrungene Material beschädigt wird. Auf diese Weise sind beliebige geometrische Bahnen und damit Formen durch Photodisruption in dem Material herausschneidbar.

Beim bevorzugten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ist eine Vorrichtung vorgesehen, bei der der gepulste Arbeitsstrahl durch die Strahlablenkeinrichtung auf das Material applizierbar ist und währenddessen die Repetitionsrate der Pulse des Arbeitsstrahles modifizierbar ist. Durch das Vorsehen einer Einrichtung zur Modifizierung der Repetitionsrate bei gleichzeitiger Strahlführung des Arbeitsstrahles über das zu bearbeitende Material kann auf diese Weise elegant ein gleichmäßiges Spotmuster auf dem zu behandelnden Material erzeugt werden, auch wenn der Strahl unter verschiedenen Winkeln bzw. verschieden schnell durch die Ablenkeinrichtung auf das zu bearbeitende Material gerichtet wird. Ein besonders augenfälliger Vorteil wird beispielsweise dann erreicht, wenn die Ablenkeinrichtung den Strahl in Kreisbahnen auf das zu bearbeitende Material lenkt und diese Kreisbahnen mit einer speziellen Umlauffrequenz der Ablenkeinrichtung, insbesondere beispielsweise der Ablenkspiegel, erzeugt wird. Wird bei einer Umlauffrequenz von beispielsweise 50Hz der Laserstrahl

auf einer Kreisbahn von einem Durchmesser bei einer Repetitionsrate 300kHz geführt, dann werden auf jeder Kreisbahn pro Umlauf gleichmäßig verteilt 60000 Spots gesetzt. Wenn der Strahl dann auf einem Kreis von nur 0,5cm Durchmesser mit derselben Frequenz der Ablenkeinrichtung geführt wird, kann durch Erniedrigung der Repetitionsrate des gepulsten Arbeitsstrahles der gleiche Abstand der einzelnen Spots voneinander auf dem zu bearbeitenden Material erzeugt werden, wie bei der Strahlführung auf der größeren Kreisbahn. Durch eine entsprechende Modifikation der Repetitionsrate in Abhängigkeit der durch die Ablenkeinrichtung abgefahrenen Geometrie lassen sich so beliebige geometrische Muster mit einem im Wesentlichen gleich bleibenden Spotabstand auf dem zu bearbeitenden Material erzeugen. Beispielsweise können Spiralen abgefahren werden, bei denen von außen nach innen bei gleichbleibender Umlauffrequenz der Ablenkeinrichtung die Repetitionsrate immer weiter abnimmt. Daneben sind auch beliebige andere geometrische Formen denkbar. Ist eine konstante Beabstandung der einzelnen Spots auf dem Material gerade nicht beabsichtigt, sondern soll vielmehr in einem speziellen Bereich eine höhere Spotdichte und in einem weiteren Bereich eine niedrigere Spotdichte erreicht werden, so kann dies ebenfalls durch Kombination der gewählten Parameter für die Repetitionsrate des Arbeitsstrahles und die Frequenz bzw. den örtlichen Verlauf der Ablenkeinrichtung erzeugt werden. So ist es bevorzugt auch möglich, graduell unterschiedliche Bereiche mit verschiedener Fokusdichte zu erzeugen. Beispielsweise kann bei einem Kreis das Zentrum einen sehr niedrigen Fokusabstand aufweisen während der Fokusabstand zum Rand hin immer größer wird.

Die Aufgabe wird auch durch ein Verfahren zur Applikation von fs-Pulsen einer cavity-dumped fs-Oszillator Strahlquelle auf ein Material, insbesondere ein organisches Material, gelöst, bei der im Fokus des Laserstrahls das Material mit Photodisruption bearbeitet bzw. dessen Zusammenhalt aufgelöst wird.

Beim besonders bevorzugten Verfahren der vorliegenden Erfindung wird der gepulste Laserstrahl mittels einer Ablenkeinrichtung auf das zu bearbeitende Material gelenkt und in Abhängigkeit des hierdurch auf dem Material erzeugten Spotmusters die Repetitionsrate der Pulse des Laserstrahls modifiziert. Auf diese Weise kann jedes beliebige Spotmuster und insbesondere jede beliebige Beabstandung der einzelnen Spots voneinander in der gewünschten Geometrie auf dem zu bearbeitenden Material erzeugt werden. Besonders bevorzugt werden die Spotmuster so auf dem zu bearbeitenden Material verteilt, dass die Kavitationsblase jedes einzelnen Spots, die durch Photodisruption entsteht, genau benachbart zu der Kavitationsblase des nächsten Spots gesetzt werden. Auf diese Weise entsteht dann ein gewünschtes Schnittmuster direkt

benachbarter Kavitationsblasen. Für spezielle Anwendungsfälle kann auch gewünscht sein, die Spots noch enger zu setzen. Dies ist beispielsweise dann empfehlenswert, wenn das zu bearbeitende Material sich nach einer gewissen Zeit wieder erneuert und die Ablösung des Materials für eine spezielle Zeit sichergestellt werden soll, bevor beispielsweise der Bohrkern oder ein sonst herausgeschnittenes Stück des zu bearbeitenden Materials entfernt werden kann. Ebenso ist es denkbar, dass die Spots zuerst mit einer größeren Beabstandung gesetzt werden, um in einem folgenden Schritt die Lücken zwischen den Spots zu füllen und dadurch ein gewünschtes Muster von Kavitationsblasen zu bilden.

Im Folgenden sollen weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung an Hand der Zeichnung erläutert werden. Hierbei zeigt

- Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Lasers
- Fig. 2 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Lasers mit Operationsmikroskop und zu bearbeitendem Auge;
- Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung von einigen Beispielen möglicher Schnittmustern, die mit dem erfindungsgemäßen Lasersystem ausgeführt werden können;
- Fig. 4 zeigt schematisch eine Detailansicht einer Folge von Laserspots auf Kreislinien und
- Fig. 5 zeigt den zeitlichen Verlauf von Folgen von Laserpulsen im und außerhalb des Laserresonators.

In **Figur 1** ist eine schematische Darstellung der einzelnen Komponenten eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Lasersystems dargestellt. Die Bearbeitungsvorrichtung 1 umfaßt als Strahlquelle 11 einen cavity-dumped fs-Oszillator. Der Laserstrahl 15 wird über Spiegel und einen Strahlteiler 57 auf eine Strahlaufweitungsoptik 21 ausgekoppelt. Der aufgeweitete Laserstrahl 15' wird dann über eine Strahlablenkungseinrichtung wie beispielsweise einen Scanner in XY-Richtung auf eine Strahlfokussierungseinrichtung 24 gelenkt. Diese ist in der Z-Achse verschiebbar und erlaubt so die Verschiebung des Fokuspunktes durch Verschiebung der Strahlfokussierungseinrichtung entlang des Pfeiles Z. Alternativ kann ein fokussierendes

optisches System mit veränderlicher Brennweite verwendet werden, um die Fokusposition in Z-Richtung kontrolliert zu verschieben. Der fokussierte Laserspot 16 wird so auf das zu bearbeitende Material 90 gelenkt, das durch eine Fixierungsvorrichtung 32 in seiner Position gehalten wird. Das Material 90 ist hier eine zu bearbeitende Kontaktlinse. Der Spot 16 kann auch durch Verschieben der Fixierungsvorrichtung 32 in Richtung XY' bzw. Z' auf bzw. in dem Material ausgerichtet werden.

Durch die Bearbeitungsvorrichtung 1 wird der von der Strahlquelle 11 erzeugte Laserstrahl 15 auf das Material 90 fokussiert. Ein Fokusdurchmesser von wenigen Mikrometern kann dadurch erreicht werden, dass der Laserstrahl 15 mit einem Strahldurchmesser von einigen Millimetern durch eine Optik mit einigen Zentimetern Brennweite fokussiert wird. Beispielsweise ergibt sich für ein gaußförmiges Strahlprofil ein Fokusdurchmesser von drei Mikrometern, wenn ein Laserstrahl der Wellenlänge 1000 nm und einem Strahldurchmesser von 10 mm mit einer Brennweite von 50 mm fokussiert wird.

Im Allgemeinen besitzt der Laserstrahl 15 am Ausgang der Strahlquelle 11 einen geringeren Strahldurchmesser als zur optimalen Fokussierung notwendig ist. Mit einer Strahlaufweitungsoptik 21 kann der Strahldurchmesser den Erfordernissen angepaßt werden. Bevorzugt kann als Strahlaufweitungsoptik 21 ein auf unendlich eingestelltes Teleskop nach Galilei (Zerstreuungslinse plus Sammellinse) eingesetzt werden. Hierbei entsteht kein Zwischenfokus, der unter Umständen schon zu einem optischen Durchbruch in Luft führen könnte. Damit ist die verbleibende Laserenergie höher und das Strahlprofil gleichbleibend gut. Bevorzugt ist die Verwendung von Linsensystemen, die zu optimalen Abbildungseigenschaften des Teleskops führen. Durch Justage des Teleskops können auch Fertigungsschwankungen in der Strahldivergenz der Strahlquelle 11 ausgeglichen werden.

In diesem Ausführungsbeispiel wird der Laserfokus scannend über bzw. durch das Material bewegt. Der Laserfokus bzw. Laserspot 16 wird so dreidimensional mit Mikrometergenauigkeit gescannt. Der aufgeweitete Laserstrahl 15' wird senkrecht zur ursprünglichen Strahlrichtung durch eine Ablenkeinrichtung 23 abgelenkt. Hierbei verschiebt sich die Lage des Fokus 16 nach der Fokussieroptik 24 senkrecht zur ursprünglichen Strahlrichtung. Damit kann der Fokus in einer Fläche, die im Wesentlichen eben und senkrecht zur Laserstrahlrichtung ist (X/Y-Richtung) bewegt werden. Die Bewegung parallel zur Strahlrichtung (Z-Richtung) kann zum einen durch bewegen des Werkstücks erfolgen (siehe Pfeil Z'). Die Scan-Algorithmen sind dann

bevorzugt so ausgelegt, dass das Werkstück nur langsam bewegt werden muß und die schnellen Scannbewegungen von der Ablenkeinheit ausgeführt werden. Zum anderen kann auch die Fokussieroptik parallel zur Laserstrahlrichtung bewegt werden (Pfeil Z), um damit den Fokus in Z-Richtung zu senken. Insbesondere bei medizinischen Applikationen ist die zweite Methode bevorzugt, da der Patient im allgemeinen nicht schnell genug bewegt werden kann.

Das bearbeitete Material 90 wird relativ zum Lasergerät in einer Fixier- und Justagevorrichtung 32 fixiert. Bevorzugt wird hier die Fixiervorrichtung senkrecht und parallel zur Strahlrichtung justiert, um das Schnittmuster an die vorgesehene Stelle im Material 90 plazieren zu können. Ein mit dem bearbeitenden Laserstrahl 15, 15' kollinearer sichtbarer Laserstrahl aus einem Pilotlaser 27 unterstützt hierbei die Justierung.

Zur Strahlführung und zur Feinjustage der Strahllage zwischen den einzelnen Komponenten sind Spiegel bzw. Spiegelpaare 22 vorgesehen. Die Beschaffenheit der Spiegel wird bevorzugt so gewählt, dass der bearbeitende Laserstrahl diesen nicht zerstört, die Spiegel hoch reflektierend für die Wellenlänge des BearbeitungsLasers und hinreichend reflektierend für den Pilotlaser sind. Bevorzugt wird die Beschichtung so gewählt, dass der Spiegel die Laserpulsdauer nicht wesentlich verlängert. Besonders bevorzugt wird mindestens einer der Spiegel ein sogenannter "Chirped Mirror" sein, mit dem die Dispersion aller im Strahlengang vorhandenen Optiken kompensiert werden kann, um optimal kurze Pulse im Bearbeitungsfokus zu erzielen.

In **Figur 2** ist ein weiteres Ausführungsbeispiel der vorliegenden Laserbearbeitungsvorrichtung mit Operationsmikroskop gezeigt. Der Aufbau entspricht im Wesentlichen dem Aufbau in Figur 1. Gleiche Teile sind mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet. Als Material 90 ist hier ein menschliches Auge vorgesehen. Es soll nun beispielhaft dieses Lasergerät detailliert beschrieben werden, mit dem präzise Schnitte in der Hornhaut des menschlichen Auges eingebracht werden können. Dabei soll eine kreisförmige Fläche, die der Krümmung der Hornhaut folgt und zur optischen Achse des Auges zentriert ist, mit fs-Laserpulsen innerhalb der Hornhaut geschnitten werden. Durch einen kreissegmentförmigen Randschnitt von der Kreisfläche bis zur Außenseite der Hornhaut entsteht ein Hornhautlappen (Flap), der nach dem Laserschnitt zur Seite geklappt werden kann.

Solche ein Flap dient zur Vorbereitung einer LASIK-Operation, bei der durch Laserabtrag die Dicke der Hornhaut so variiert wird, dass refraktive Fehler des Auges

kompensiert werden. Hier wird dieser Schnitt mit einem mechanischen Keratom durchgeführt, was ein hohes Maß an Übung beim Arzt voraussetzt und risikobehaftet ist. Zusätzlich kann durch eine weitere gekrümmte Kreisfläche, die zusammen mit der ersten Kreisfläche des Flaps ein Lentikel umschließt, das nach Aufklappen des Flaps entnommen werden kann, im gleichen Arbeitsgang eine refraktive Korrektur der Hornhaut erfolgen.

Bei der besonderen Ausgestaltung der Erfindung wird das Auge durch einen Saugring 32 an ein Kontaktglas 31 gedrückt, das entweder eben ist, oder bevorzugt der Krümmung der Hornhaut im Wesentlichen angepaßt ist. Der Saugring ist fest mit dem Austrittsfenster des Lasergerätes verbunden, was für eine definierte Lage der Hornhaut relativ zum Laserfokus sorgt. Der aufgeweitete Femtosekunden-Laserstrahl wird mit einer Optik 24 in die Hornhaut fokussiert. Ein Strahlteiler, der für die Laserwellenlänge hochreflektierend und für sichtbares Licht transmittierend ist, spiegelt den Laserstrahl in den Strahlengang eines Operationsmikroskopes ein, das zur Beobachtung und Zentrierung des Auges dient. Die Fokussieroptik 24 bildet dabei einen Teil des Mikroskopobjektives. Zusammen mit einer bündelnden Optik kann ein reelles Zwischenbild der Hornhaut erzeugt werden, das man sich mit dem Stereo-Okular 80 räumlich anschauen kann. Die Strahlableitvorrichtung 23 lenkt den aufgeweiteten Laserstrahl 15 senkrecht zu dessen Ausbreitungsrichtung aus. Somit kann der Laserfokus auf unterschiedliche Punkte in der Hornhaut gerichtet werden. Die Fokustiefe kann durch Verschieben der Fokussieroptik 24 längs der optischen Achse oder durch Anpassung der Brennweite der Fokussieroptik variiert werden.

Vorzugsweise werden mit der Ablenkeinheit Kreisbahnen abgefahren. Zum Schneiden der Kreisfläche wird der Kreisradius von Kreisbahn zu Kreisbahn verringert und die Repetitionsrate so angepasst, dass ein einheitlicher Spot-Abstand beibehalten wird. Die Fokustiefe wird von Kreisbahn zu Kreisbahn so angepasst, dass der Schnitt der Krümmung der Hornhaut folgt. Sollen astigmatische Korrekturen der Sehkraft (Zylinderkorrektur) eingebracht werden, kann die Fokustiefe während der Kreisbahn zweimal auf und ab bewegt werden, so dass ein Lentikel mit Zylinderlinsenanteil entsteht. Für die Flapkante wird bei festem Radius die Fokustiefe vom Flapboden langsam bis zur Außenseite der Hornhaut verschoben, so dass ein Zylindermantel entsteht. Auf einem Bogenstück der dabei beschriebenen Kreise muss der Laserstrahl unterbrochen werden, um einen "Hing", an dem der präparierte Flap festgehalten wird, zu belassen. Dazu wird einfach das Auskoppeln von Laserpulsen aus der Strahlquelle 11 unterbrochen.

Die Strahlquelle 11 ist ein "cavity-dumped" Femtosekunden-Oszillator, der bevorzugt direkt diodengepumpt und damit einfach und zuverlässig ist. Der emittierte Laserstrahl 15 wird bevorzugt mit einem Galilei-Teleskop auf 1-2 cm Strahldurchmesser aufgeweitet. Kollinear zum aufgeweiteten Laserstrahl 15 wird ein sichtbarer Laserstrahl aus einem Pilotlaser 27 überlagert, der dann zusammen mit dem Bearbeitungslaserstrahl gescannt und fokussiert wird. Der Strahlteiler 57 ist für diesen Zweck transparent für die Femtosekunden-Laserwellenlänge und reflektierend für den Pilotstrahl.

Die Vielfalt der möglichen Schnittfiguren hängt nur von den Scannalgorithmen ab. Prinzipiell ist ein Lasergerät wie beschrieben zu einer Vielzahl von Applikationen (beispielsweise für refraktive Korrekturen der Sehkraft), bei denen Schnitte oder Strukturumwandlungen innerhalb der transparenten Bestandteile des Auges (Hornhaut, Linse, Glaskörper) und auf den nichttransparenten Teilen wie Sclera, Iris, Zilliarkörper vorgenommen werden sollen, geeignet. Damit übertrifft die Erfindung selbst in diesem kleinen Teilbereich der Anwendung in Universalität und Präzision (Schonung von umliegendem Gewebe) bestehende Technologien bei weitem.

In **Figur 3** sind in den Unterdarstellungen 3 a bis d Anwendungsbeispiele von Schnittgeometrien gezeigt, die mit dem erfindungsgemäßen Lasersystem realisiert werden können. Diese Anwendungen sind nur beispielhaft - es können beliebige weitere Geometrien realisiert werden. Im Fokus 16 des Lasers wird der Zusammenhalt des Materials 90 aufgehoben (Photodisruption). Im Allgemeinen geht das mit einer lokalen Verdampfung des Materials einher. Nach der Einwirkung des Laserpulses ist in einem kleinen Volumen, der Kavitationsblase (im folgenden auch Spot 16 genannt) das Materialgefüge dauerhaft oder für einen bis mindestens zum Ende der Bearbeitungsdauer dauernden Zeitraum aufgehoben. Der Einsatz eines hart fokussierten Femtosekunden-Lasers bzw. -Oszillators bietet damit die präziseste Lokalisierung der Laserwirkung. In dem scharf begrenzten Fokusbereich wird damit das Materialgefüge zerstört, während es in dicht benachbarten Bereichen (schon weniger als ein Mikrometer entfernt) im Allgemeinen keine Veränderung des Materials stattfindet. Daraus ergibt sich eine hohe Bearbeitungspräzision bei Schonung benachbarter Materialregionen.

Für Schnitte und Strukturierungen werden eine Vielzahl von einzelnen Spots, die das Materialgefüge auflösen, dicht nebeneinander platziert. Der Abstand benachbarter Spots sollte am Ende der Prozedur in der Größenordnung des Spotdurchmessers liegen. In **Figur 3 a** wird ein vorbestimmtes Volumen (z.B. eine Bohrung im Material) durch vollständiges Ausfüllen des abzutragenden Volumens mit einzelnen Spots 16 generiert.

Bei einem solchen nicht transparenten Material geht man dabei schrittweise beginnend mit der dem Laser zugewandten Schicht von Spots vor.

In Figur 3 b wird nur der Rand der Bohrung mit Spots überdeckt. Es soll hier ein Schnitt durch das Material gezeigt sein. Die Spots 16 sollen rotationssymmetrisch um die gestrichelt eingezeichnete Achse Z angeordnet sein. Auf diese Weise wird ein Bohrkern in der Mitte des bearbeiteten Materials 90 erzeugt. Der Bohrkern kann anschließend als zusammenhängendes Stück entnommen werden. Die benötigte Anzahl von Laserpulsen verringert sich damit insbesondere bei großen Querschnittsflächen der Bohrung erheblich im Vergleich zur Figur 3 a.

In Figur 3 c ist eine Unterschneidung in einem transparenten Material 90 gezeigt. Da die Strahlung vom Material 90 nicht absorbiert wird, sind zusammenhängende Materialstücke durch Platzierung von Spots auf der Schnittkante aus dem Material herauslösbar, wenn dieses an die Oberfläche grenzt.

In Figur 3 d ist gezeigt, wie in einem transparenten Material je nach Beschaffenheit des Materials Hohlräume bzw. Strukturierungen (z.B. Änderungen der optischen Eigenschaften) erzeugt werden können.

Für makroskopische Schnittfiguren (im Zentimeterbereich) werden einige Millionen Laserspots benötigt, selbst um nur die Schnittfläche (wie in Figuren 3 b und c) dicht genug mit Spots zu überdecken. Für viele Anwendungen (insbesondere medizinische Applikationen) ist es vorteilhaft, die Bearbeitungs- bzw. Behandlungszeit so gering wie möglich zu halten. Die Strahlquelle des Lasergeräts sollte daher in der Lage sein, Laserpulse mit einer hohen Repetitionsrate abzugeben. Kontinuierlich (im cw-modelocking-Betrieb) arbeitende Femtosekunden-Laseroszillatoren nach dem Stand der Technik weisen meistens Repetitionsraten von einigen zehn MHz auf - die Pulsenergien im nJ-Bereich reichen bei hinreichenden großen Brennweiten der Fokussieroptik (Arbeitsabstand von einigen cm) nicht aus, um einen optischen Durchbruch im Material zu erzeugen. Dies wird mit einem erfindungsgemäßen Lasersystem jedoch erreicht.

In Figur 4 wird schematisch ein Ausschnitt aus einem möglichen Scanmuster gezeigt, bei dem die einzelnen von einzelnen Laserpulsen bearbeiteten Spots 16 entlang von Bahnen angeordnet sind, die vom Scanner kontinuierlich abgefahren werden können. Um bei hohen Repetitionsraten der Strahlquelle 11 einen hinreichenden großen Spotabstand zu erzielen, wird der Fokus in mindestens einer von drei Scandimensionen sehr schnell bewegt. Die Scan-Algorithmen werden daher bevorzugt so ausgelegt, dass

die Spots entlang von Bahnen, die den natürlichen Bewegung der Ablenkeinheit entsprechen, platziert werden. Die Bewegung in den anderen zwei Dimensionen kann dann relativ langsam erfolgen. Die natürlichen Bahnen der Ablenkeinheit können z.B. Kreisbahnen sein, die die Ablenkeinheiten mit festen Umlauffrequenzen abfahren kann. Das kann z.B. durch rotierende optische Elemente in der Ablenkeinheit erfolgen. Der Radius der Kreisbahn und die Fokustiefe (Z-Richtung) sind dann die langsam veränderbaren Scangrößen. Diese Variante eignet sich besonders, wenn rotationssymmetrische Schnittfiguren erzeugt werden müssen. Die Repetitionsrate des Lasers läßt sich dann besonders effektiv nutzen, wenn die Umlauffrequenz der Kreisbahnen so gewählt wird, dass bei den größten abzufahrenden Kreisbahnen (B) die volle Repetitionsrate der Strahlquelle zum gewünschten Spotabstand b führt. Werden die Kreisbahnen beim Abfahren des Schnittmusters kleiner im Radius (A), kann die Repetitionsrate der Quelle entsprechend verringert werden, so dass sich wieder der optimale Spotabstand ergibt. Diese Anpassung der Repetitionsrate ist bei einem geeigneten cavity-dumped Oszillator ohne Weiteres möglich. Eine Anpassung der Umlauffrequenz an die Repetitionsrate der Quelle kann technologisch schwieriger sein, insbesondere wenn diese kontinuierlich für jede Kreisbahn (A, B) erfolgt. Für eine Verringerung der Bearbeitungszeit kann aber eine Anpassung der Umlauffrequenz in wenigen Schritten an die kleineren Kreisbahnen von Vorteil sein.

In **Figur 5** sind mögliche Folgen von Laserpulsen im und außerhalb des Laserresonators dargestellt. Die Umlauffrequenz der Laserpulse im Oszillator 40 hängt nur von der Resonatorlänge ab und ist für eine bestimmte Strahlquelle vorgegeben und liegt bei Resonatorlängen von wenigen Metern um 100 MHz. Das Prinzip des cavity dumping ist es, einen Teil des im Resonator umlaufenden Pulses 45 zu einem bestimmten Zeitpunkt mit einem schaltbaren optischen Element auszukoppeln. Dabei verlässt ein Großteil der Intracavity-Pulsenergie die Strahlquelle und wird als Ausgangslaserpuls 46 in das Strahlablenksystem geleitet.

Die im Resonator verbleibende Pulsenergie wird nach einer Anzahl von Umläufen im Resonator wieder auf ihren Sättigungswert verstärkt 42 und kann anschließend von neuem ausgekoppelt werden. Die ausgekoppelten Laserpulse 46 haben somit eine geringere Repetitionsrate als die Intracavity-Pulse 45. Die maximale Repetitionsrate ist durch die Zeit bis zum Wiedererlangen der Sättigungspulsenergie nach Auskoppeln eines Laserpulses vorgegeben. Der Verlauf der Intracavity-Pulsenergie entspricht dann in etwa dem in **Figur 5** als 42 gezeigten Verhalten.

Die Repetitionsrate kann einfach dadurch verringert werden, dass eine gewisse Zeit nach Erreichen der Sättigungspulsenergie erneut ausgekoppelt wird 43, 44. Die Zeit zwischen zwei ausgekoppelten Laserpulsen (Reziproke der Repetitionsrate) kann also in Schritten der Resonatorumlaufzeit frei zwischen unendlich (Repetitionsrate null) und einem Minimum (maximale Repetitionsrate) eingestellt werden. Damit kann die Pulsfolgefrequenz der Ablenkgeschwindigkeit des Strahlablenksystems angepasst werden. Bei typischen Verhältnissen der ausgekoppelten Repetitionsrate zur Umlauffrequenz im Resonator von 1:100 - 1:1000 kann somit die Zahl der pro Umlauf der Ablenkeinheit platzierten Laserspots in minimalen Schritten von 0,1 - 1 % variiert werden. Die Spotabstände auf unterschiedlichen Kreisbahnen streuen dann nur um Bruchteile von einem Prozent.

Mit der vorliegenden Erfindung wurde ein Lasergerät bereitgestellt, das eine Femtosekunden-Strahlquelle umfaßt und bevorzugt auch Mittel zur Strahlformung und -führung, eine programmierbare Strahlablenkung, eine Strahlfokussierung und einer Vorrichtung zur Positionierung und Fixierung des zu bearbeitenden Materials bzw. Gewebes. Die Vorrichtung ist hinsichtlich Laserpulsparametern, Repetitionsrate und Ablenkgeschwindigkeit und -genauigkeit bevorzugt zum präzisen Schneiden und Strukturieren geeignet. Dabei kann bei für die Laserwellenlänge transparenten Materialien die Bearbeitung auch innerhalb des Materials erfolgen. Das zu entfernende Material muss dabei nicht vollständig vom Laser abgetragen werden, sondern durch geeignete Schnittführung können zusammenhängende Materialregionen intakt entfernt werden. Die Schnittgenauigkeit hängt vom Durchmesser des Laserfokus ab und liegt im Mikrometer- und Submikrometerbereich. Die Verwendung von Laserimpulsen mit einer Pulsdauer deutlich unter einer Pikosekunde reduziert die kolaterale Material- bzw. Gewebeschädigung nahezu vollständig und trägt damit wesentlich zur Bearbeitungspräzision bei und erlaubt insbesondere die medizinische Behandlung von sensiblen Geweben in-vivo.

* * * * *

Patentansprüche

1. Vorrichtung (1) zur präzisen Bearbeitung von Material (90), insbesondere organischem Material, umfassend ein gepulstes Lasersystem (10) mit einer Strahlquelle (15)
dadurch gekennzeichnet, dass
ein cavity-dumped fs-Oszillator (11) als Strahlquelle vorgesehen ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1
dadurch gekennzeichnet, dass
weiterhin Strahleinrichtungen (20) zur Strahlformung (21) und/ oder Strahlführung (22) und/oder Strahlablenkung (23) und/oder Strahlfokussierung (24) vorgesehen sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2
dadurch gekennzeichnet, dass
die Strahleinrichtungen (20) programmierbar sind.
4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche
dadurch gekennzeichnet, dass
weiterhin Haltevorrichtungen (30) zur Positionierung (31) und/ oder Fixierung (32) des zu bearbeitenden Materials (90) vorgesehen sind.
5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche
dadurch gekennzeichnet, dass
durch den cavity-dumped fs-Oszillator (11) Laserpulse von 100 nJ bis 100 μ J, bevorzugt 1 μ J Pulsenergie bereitstellbar sind.
6. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche
dadurch gekennzeichnet, dass
durch den cavity-dumped fs-Oszillator (11) Laserpulse mit Repetitionsraten von 10 kHz bis 10 MHz bereitstellbar sind.
7. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche
dadurch gekennzeichnet, dass

durch die Ablenkeinrichtungen (20) ein Arbeitsstrahl Strahlquelle in geometrisch vorbestimmbaren Formen in zeitlich vorbestimmbarem Verlauf auf das Material (90) applizierbar ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7,
dadurch gekennzeichnet, dass
der gepulste Arbeitsstrahl durch die Strahlablenkeinrichtung (23) aus das Material applizierbar ist und währenddessen die Repetitionsrate modifizierbar ist.
9. Verfahren zur Applikation eines Laserstrahls von fs-Pulsen einer cavity-dumped fs-Oszillator Strahlquelle auf ein Material, insbesondere ein organisches Material, dadurch gekennzeichnet, dass
im Fokus des Laserstrahls der Zusammenhalt des Material mittels Photodisruption aufgelöst wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9,
dadurch gekennzeichnet, dass
der gepulste Laserstrahl mittels einer Ablenkeinrichtung auf das zu bearbeitende Material gelenkt wird und in Abhängigkeit des hierdurch auf dem Material erzeugten Spotmusters die Repetitionsrate der Pulse des Laserstrahls modifiziert wird.
11. Verwendung einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7 zur refraktiven Chirurgie.

Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung (1) zur präzisen Bearbeitung von Material (90), insbesondere organischem Material, umfassend ein gepulstes Lasersystem (10) mit einer Strahlquelle (15), wobei ein cavity-dumped fs-Oszillator (11) als Strahlquelle vorgesehen ist.

(Fig. 1)

Bezugszeichenliste

- 01. Bearbeitungsvorrichtung
- 10. Lasersystem
- 11. Cavity-dumped fs-Oszillator
- 15. Laserstrahl
- 15'. aufgeweiteter Laserstrahl
- 16. Laserspot/ Laserfokus
- 20. Strahleinrichtung
- 21. Strahlformungseinrichtung/ Strahlaufweitungsoptik
- 22. Strahlführungseinrichtung/ Spiegel
- 23. Strahlablenkungseinrichtung/ Scanner
- 24. Strahlfokussierungseinrichtung/ Linsen
- 27. Pilotlaser
- 30. Haltevorrichtung
- 31. Positionierungsvorrichtung/ Kontaktglas
- 32. Fixierungsvorrichtung/ Saugring
- 80. Beobachtungsmikroskop
- 90. Material/ Auge

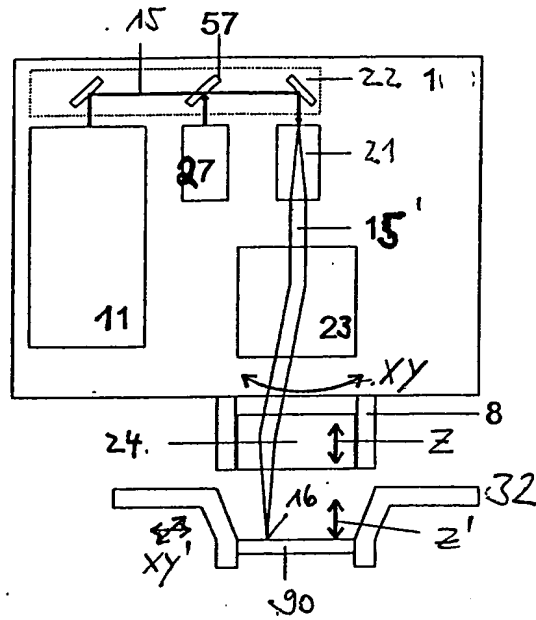


fig 1

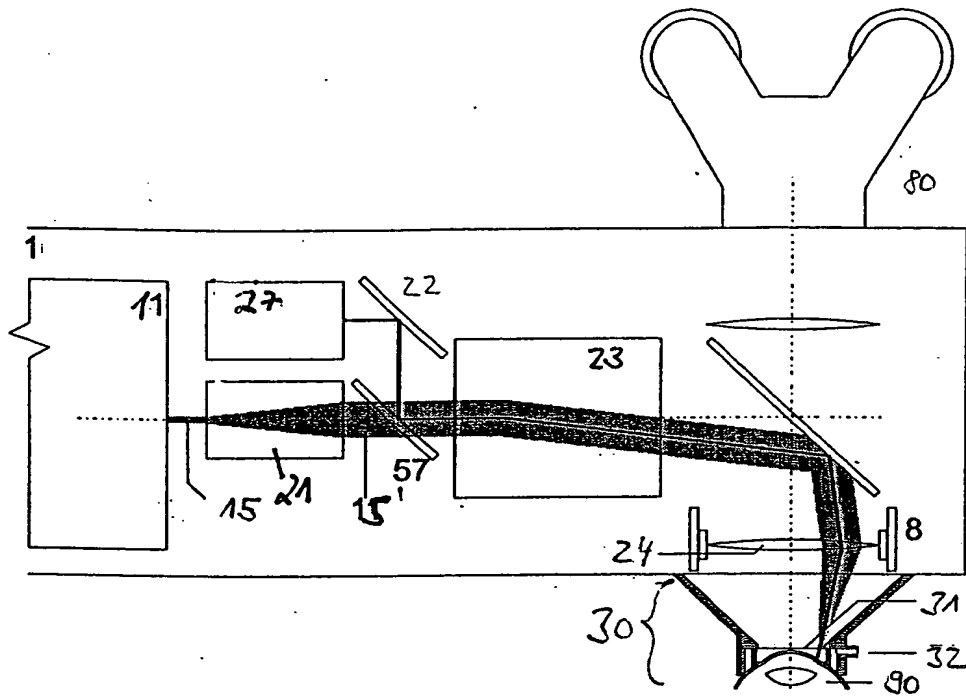
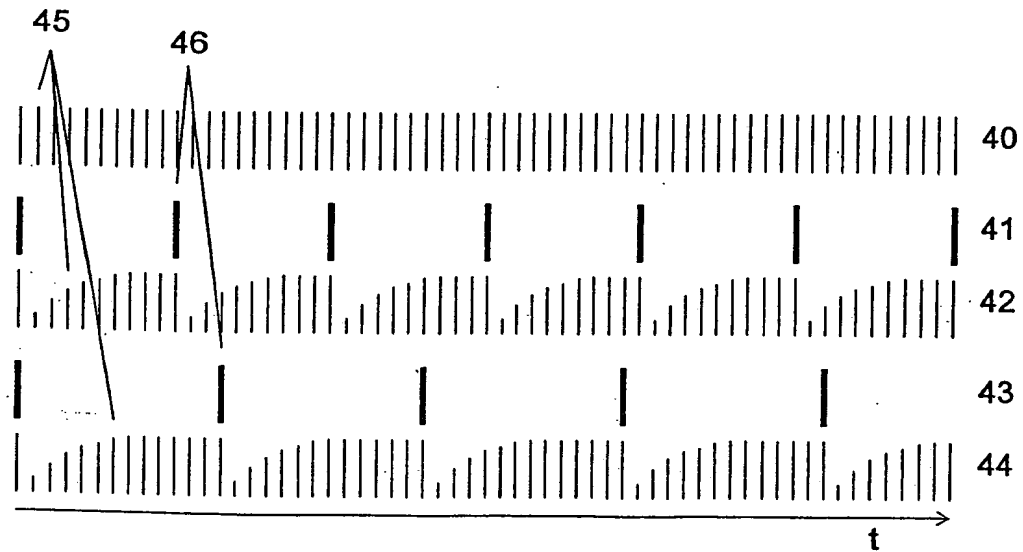
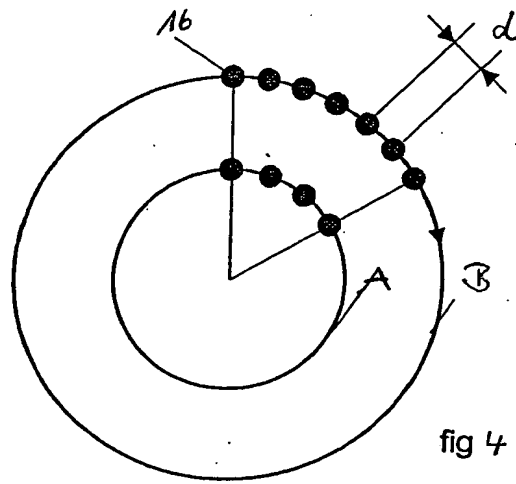
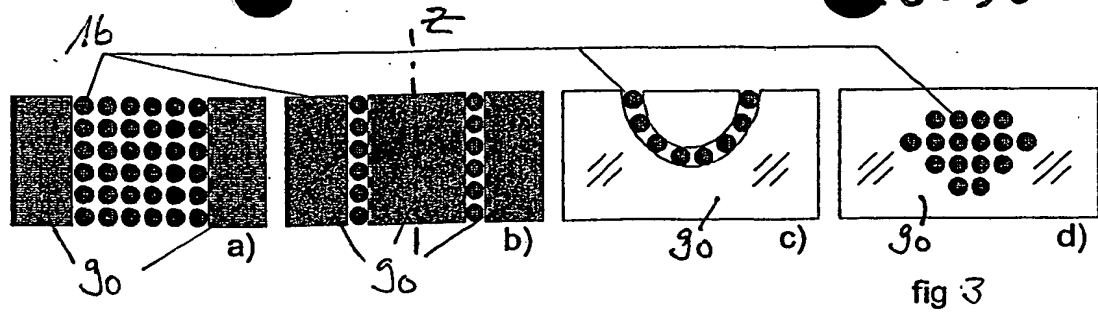


fig 2



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.